



# Subproductos agroindustriales y recursos autóctonos

## Procesamiento y técnicas de análisis

L. Almilla-Beltrán, P. Buera,  
B.H. Camacho-Díaz, J. Gabilondo  
Compiladoras

 **INTA** Ediciones

*Colección*  
INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN

# Subproductos agroindustriales y recursos autóctonos

## Procesamiento y técnicas de análisis

*L. Alamilla-Beltrán, P. Buera, B.H. Camacho-Díaz, J. Gabilondo  
Compiladoras*



Ministerio de Agricultura,  
Ganadería y Pesca  
**Argentina**

*INTA Ediciones  
Estación Experimental Agropecuaria San Pedro  
2022*

66:63 Subproductos agroindustriales y recursos autóctonos : procesamiento y  
Su16 técnicas de análisis / Compiladoras: L. Alamilla-Beltrán...[et al. ] –  
Buenos Aires : Ediciones INTA, Estación Experimental Agropecuaria  
San Pedro, 2022.  
295 p. : il. (PDF)

Otros compiladores: P. Buera, B.H. Camacho-Díaz, J. Gabilondo

ISBN 978-987-679-329-2 (digital)

i. Alamilla-Beltrán, L. ii. Buera, María del Pilar. iii. Camacho-Díaz, B.H. iv.  
Gabilondo, J.

AGROINDUSTRIA – SUBPRODUCTOS – TECNOLOGIA – PROCESAMIENTO

DD-INTA

*Este documento es resultado del financiamiento otorgado por el Estado Nacional, por lo tanto, queda sujeto al cumplimiento de la Ley N° 26.899.*

*Se enmarca dentro del Programa Nacional de Agroindustria y agregado de valor y el Proyecto Específico 1130043 “Estrategias para la Diferenciación de Alimentos y el Desarrollo de Nuevos Productos Alimentarios”.*

*Fue elaborado con la inestimable colaboración del Programa CYTED.*

**Diseño de tapa y diagramación:**

Mariana Piola  
Fedra Albarracín

*Este libro  
cuenta con licencia*



# Autores



Miembros de la Red Iberoamericana CYTED 415RT0495 en la Universidad de La Sabana, Bogotá Colombia. De izquierda a derecha: Antonio Jiménez-Aparicio, César Augusto Cortes-García, Cecilia Abirached, Tatiana Aguirre-Costa, Patricio Santagapita, Florencia Mazzobre, Diomedes Díaz-Suárez, Patricia Risso, Fernando Ferreira, Sergio Rozycki, Pilar Buera, Fabiano Freire-Costa, Julieta Gabilondo, Rafael Giménez-Martínez, Liliana Alamilla-Beltrán, Franco Vasile, Paz Robert-Canales, Luis Panizzolo, Mónica Nazareno, Diany Arzuga-Pernett, Oscal Vega-Castro, Erick Rojas-Balcazar, Brenda Camacho-Díaz.



Miembros de la Red Iberoamericana CYTED 415RT0495 en la Universidad de La Sabana, Bogotá Colombia. De izquierda a derecha: arriba: César Augusto Cortes-García, Diomedes Díaz-Suárez, Aldo Fernández-Varela, Franco Vasile, Patricio Santagapita, Luis Panizzolo, Cecilia Abirached, Micaela Galante, Fernando Ferreira, Fabiano Freire-Costa. Abajo: Camilo Sandoval, Arjana Serrano, Julieta Gabilondo, Ximena Quintanilla-Carbajal, Florencia Mazzobre, Paz Robert-Canales, Antonio Jiménez-Aparicio, Pilar Buera, Erick Rojas-Balcazar, Sergio Rozycki, Patricia Risso, Liliana Alamilla-Beltrán, Myriam Villarreal, Mónica Nazareno, Brenda Camacho-Díaz, Leonardo Martín Calderón, Diany Arzuga-Pernett, Rafael Giménez-Martínez (en cuclillas).

## Instituciones participantes

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Argentina

Universidad de Buenos Aires. Argentina

Universidad Nacional del Litoral. Argentina

Universidad Autónoma Gabriel René Moreno. Bolivia

Universidad de Juiz de Fora. Brasil

Universidad de La Sabana. Colombia

Universidad de Chile. Chile

Universidad de Granada. España

Instituto Politécnico Nacional. México

Universidad de la República. Uruguay

Universidad Popular del César, Valledupar. Colombia

Universidad Nacional del Chaco Austral. Argentina

Universidad Nacional de Santiago del Estero. Argentina

Universidad de Antioquía. Colombia

Universidad Nacional de Rosario. Argentina



# Contenidos

<b>Parte 1. Aprovechamiento de subproductos agroindustriales y disminución de pérdidas</b>	<b>7</b>
Capítulo 1: Valorización de residuos de aguacate	8
Capítulo 2: Importancia de los fotoquímicos en los residuos de aguacate	18
Capítulo 3: Descartes de flores comestibles como fuente de compuestos bioactivos: caso rosas	26
Capítulo 4: Revalorización del suero de quesería. Productos lácteos funcionales	35
Capítulo 5: Desarrollo de biopolímeros innovadores a partir de residuos naturales	47
Capítulo 6: Ejemplo de proyecto de extensión: Negocio logístico para la cadena para la cadena hortofrutícola de pequeños parceleros en la región de Azúcar Buena, Valledupar, Colombia	59
<b>Parte 2. Valorización de recursos regionales</b>	<b>66</b>
Capítulo 7: Aprovechamiento de flores comestibles de la región como fuente de compuestos bioactivos: caso tagetes	67
Capítulo 8: Biomoléculas provenientes de la semilla de chíca: características y potencial aplicación en alimentos	75
Capítulo 9: Revalorización de la quinua y sus aplicaciones en la industria	95
Capítulo 10: Aplicaciones tradicionales y potenciales de recursos de bosques tropicales, y de cuatro especies en particular	105
Capítulo 11: Aprovechamiento y análisis de fuentes lácteas no convencionales para el desarrollo de alimentos innovadores	115
Capítulo 12: Alternativas para ampliar el potencial de gomas de fuentes regionales	128
Capítulo 13: Uso de hidrocoloide no convencional como modificador de viscosidad y textura: goma espina corona	137
<b>Parte 3. Herramientas tecnológicas y analíticas</b>	<b>150</b>
Capítulo 14: Optimización de la molienda de algarrobo para fomentar el uso no maderable de fuentes autóctonas. Aplicaciones alimentarias	151
Capítulo 15: Extrusión para el desarrollo de alimentos innovadores: Caso de productos a base de maíz	160
Capítulo 16: Evaluación de cambios fisicoquímicos en fibras de agave obtenidas por organosolv asistido por microondas	175
Capítulo 17: Reología y Textura. Aplicación en Productos Lácteos	187
Capítulo 18: Calorimetría diferencial de barrido como herramienta para promover el aprovechamiento de subproductos y recursos naturales	212
Capítulo 19: Encapsulación de compuestos bioactivos: métodos y caracterización	230
Capítulo 20: Técnicas de análisis microestructural de alimentos: análisis digital de imágenes en microscopía electrónica de barrido y microscopía confocal de barrido láser	252
Capítulo 21: Evaluación de la bioaccesibilidad de compuestos bioactivos en alimentos funcionales: modelos de digestión in vitro	265
Capítulo 22: Nuevas técnicas para la búsqueda de actividad antioxidante en mezclas naturales con aplicación en alimentos	276
Capítulo 23: Uso de herramientas estadísticas en el diseño experimental para el aprovechamiento de subproductos agroalimentarios	284

# Prólogo

En este volumen se abordan distintos aspectos clave para el aprovechamiento de subproductos agroindustriales y la valorización de recursos regionales.

Esta publicación surgió de las exposiciones y debates que tuvieron lugar en el marco de la Red Iberoamericana LACFUN-CYTED 415RT0495, del Área Desarrollo Sostenible, entre 2015 y 2019. En esta red participaron investigadores de ocho países (Argentina, Bolivia, Brasil Chile, Colombia, España, México y Uruguay) y además dos empresas (Rocío del Campo y Biofe, ambas de la Provincia de Santa Fe, Argentina) y se combinó con las actividades de un Proyecto de Desarrollo Tecnológico y Social (PDTS), financiado por CONICET (Argentina) y el CIN (Consejo Interuniversitario Nacional). Han sido invitados para contribuir a este libro los referentes internacionales relacionados con los temas abordados, relacionados con los grupos participantes. Especialmente, materializando el intercambio interredes, se ha invitado a miembros de la Red Iberoamericana de Alimentos Autóctonos Subutilizados (ALSUB-CYTED, 118RT0543), coordinada por la Dra. Sandra Sayago, a contribuir con un capítulo sobre análisis multivariado.

El desarrollo sostenible se basa en la necesidad de que exista un delicado equilibrio entre tres aspectos: el impulso económico de una región, la conservación del medio ambiente y el bienestar de la sociedad involucrada. Se plantea como uno de los objetivos de la FAO para contribuir a la seguridad alimentaria (ODS 2).

Las reuniones, que se realizaron en varios de los países miembros de la Red, tuvieron como objetivo el estudio y la difusión de los beneficios de la recuperación de subproductos agroindustriales y el aprovechamiento de recursos regionales para la producción de alimentos. Estos aspectos favorecen también la soberanía alimentaria, que es uno de los componentes de la seguridad alimentaria.

El libro está conformado por tres partes:

En la Parte 1 se discuten algunos casos sobre la utilización de subproductos agroindustriales, que además de contribuir a evitar pérdidas y desperdicios de alimentos, abren oportunidades para la obtención y desarrollo de nuevos productos, con potenciales propiedades funcionales. El aprovechamiento de desechos trae aparejado la disminución del impacto ambiental, y/o del costo de su tratamiento, a la vez que beneficia económicamente la organización por el agregado de valor a subproductos.

En la Parte 2 se tratan casos de valorización de recursos regionales con un rol central en el agregado de valor para el desarrollo económico de pequeños productores.

Por último, en la Parte 3 se discuten algunas herramientas para la obtención, caracterización e implementación de productos innovadores, que podrían producir impacto en las sociedades involucradas.

La tarea de impulsar el aprovechamiento de subproductos y de los recursos localmente disponibles para tender a la seguridad alimentaria requiere una acción concertada de los organismos de ciencia y técnica, la sociedad y los productores. Por ello, los temas se han analizado desde diversas perspectivas, con la participación de empresas que con vocación emprendedora han participado para acercar la investigación a la producción, y que sea posible llevar al mercado productos innovadores.

Hemos contado con el apoyo de programas que fomentaron la interrelación investigación-producción-desarrollo y con actores involucrados en la generación de estrategias de fomento a emprendimientos.

La creciente preocupación de los consumidores por el cuidado del medio ambiente, el reclamo de alimentos naturales y la legislación ambiental son fuerzas impulsoras importantes para la introducción de prácticas sostenibles en industrias procesadoras de alimentos, para impulsar el desarrollo de estos temas en los distintos niveles de educación y para promover su difusión al público en general.

A partir de 2021 la interacción de los grupos ha continuado en la Red AUIP (Asociación de Universitaria Iberoamericana de Posgrado), con el tema de Herramientas para una Economía Circular en Procesos Agroindustriales ([riihec.org](http://riihec.org)).

Agradecemos a todos los especialistas que han contribuido a la realización de este libro, a sus instituciones y al programa CYTED que ha hecho posible la interacción entre grupos de distintas latitudes, diferente formación y variada orientación temática, brindando las herramientas para la utilización integral de los recursos y contribuyendo a la seguridad alimentaria a través del desarrollo sostenible.

Dra. María del Pilar Buera  
Investigadora Superior de CONICET, Argentina  
FCEN-Universidad de Buenos Aires  
Coordinadora Red Iberoamericana CYTED 415RT0495

# Capítulo 15

## Extrusión para el desarrollo de alimentos innovadores: caso de productos a base de maíz

Guido Rolandelli<sup>1,2\*</sup>, Santiago García-Pinilla<sup>3</sup>, Mario Alberto Cueto<sup>1,2</sup>, Abel Farroni<sup>4</sup>, Gustavo Fidel Gutiérrez-López<sup>3</sup>, María del Pilar Buera<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Industrias y Departamento de Química Orgánica. Argentina

<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Universidad de Buenos Aires. Instituto de Tecnología de Alimentos y Procesos Químicos (ITAPROQ). Argentina

<sup>3</sup>Instituto Politécnico Nacional. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Campus Zacatenco. Departamento de Ingeniería Bioquímica. Lab. de Bioingeniería y Estructuras Alimentarias. México

<sup>4</sup>Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Estación Experimental Agropecuaria Pergamino. Argentina  
\*rolandelliguido@gmail.com

### Resumen

El proceso de extrusión ha surgido como una alternativa para el desarrollo de alimentos que presenta ventajas particulares en comparación a los métodos tradicionales. Durante el mismo, las materias primas se someten a elevadas presiones y temperaturas, pero en un corto período de tiempo, lo cual permite la conservación de nutrientes y otros compuestos valiosos. El maíz es uno de los cereales más utilizados en esta tecnología, pero presenta limitaciones a nivel nutricional, particularmente en el perfil de aminoácidos esenciales. La necesidad de complementar dicho perfil, sin modificar características físicas, químicas y mecánicas deseadas que hacen a la aceptabilidad de los consumidores ha llevado al estudio de otras harinas y materiales para el enriquecimiento e incorporación de propiedades funcionales. La utilización de extractos vegetales y subproductos agroindustriales supone la doble ventaja de aprovechamiento de materiales naturales como reemplazo de aditivos sintéticos y la disminución del daño ecológico que implica su descarte habitual. Se han estudiado una amplia variedad de nuevos ingredientes que han permitido el aumento en los niveles de proteínas, fibra y minerales, además de mejorar el contenido de compuestos bioactivos, como polifenoles y carotenoides, con demostrada actividad antioxidante, que supone efectos protectores de la salud, principalmente en lo referente a enfermedades crónicas. El correcto balance de la incorporación de estos ingredientes, junto con la combinación adecuada de los parámetros del proceso de extrusión, permiten obtener productos a base de maíz con características nutricionales y organolépticas mejoradas.

Palabras clave: Extrusión, Maíz, Cereales, Extractos Naturales, Subproductos Vegetales

### 1. La extrusión como proceso de elaboración de alimentos

Existen diferentes técnicas utilizadas para el desarrollo de alimentos a nivel industrial. La extrusión se destaca en la elaboración de productos listos para el consumo a base de cereales, ya que presenta ciertas ventajas frente a otros procesos: se trata de un proceso continuo, versátil y de bajo costo, con la flexibilidad suficiente para obtener alimentos con diferentes tamaños y formas, donde se preservan en gran porcentaje los compuestos termolábiles debido a que se utilizan cortos períodos de tratamiento térmico. La fácil incorporación de diferentes materias primas permite la obtención de una gran variedad de productos, que pueden satisfacer las diferentes necesidades del mercado (1,2). En ese sentido, los consumidores han incrementado la demanda de alimentos naturales, fáciles de consumir, con propiedades funcionales y que se encuentren adaptados a sus requerimientos nutricionales. Así, se han desarrollado una variedad de productos mediante el proceso de extrusión, que responden a esta demanda: cereales para el desayuno, barras energéticas, alimentos expandidos, texturizados de proteínas vegetales, análogos de carne, pastas, *snacks* y aperitivos de diferentes presentaciones, entre otros (Figura 1). La facilidad de consumo de estos productos se adapta al estilo de vida de los consumidores que



dedican poco tiempo a la preparación de sus alimentos, sin dejar de lado la necesidad de cubrir la ingesta recomendada de nutrientes. Aunque en muchos de estos alimentos los contenidos de sal y azúcares suelen ser elevados, la tendencia actual indica una reducción en la utilización de estos ingredientes y la fortificación, en cambio, con fibra, antioxidantes, proteínas de elevada digestibilidad, entre otros (3, 4).



**Figura 1:** Diferentes alimentos obtenidos por el proceso de extrusión (Fuente: [www.jayantfood.com](http://www.jayantfood.com))

En los últimos años, el proceso de globalización y el cambio en el estilo de vida de la población han generado un incremento en el consumo de alimentos extruidos a nivel mundial, con la aparición de mercados crecientes que demandan productos adaptados a sus necesidades. Deportistas de alto rendimiento, niños en etapa de crecimiento, mujeres embarazadas y personas de la tercera edad son algunos de los grupos con requerimientos nutricionales específicos, cuyas actividades y metabolismo exigen el consumo de alimentos de manera sencilla, saludables, con poca preparación y con un completo y adecuado perfil nutricional y densidad calórica (5).

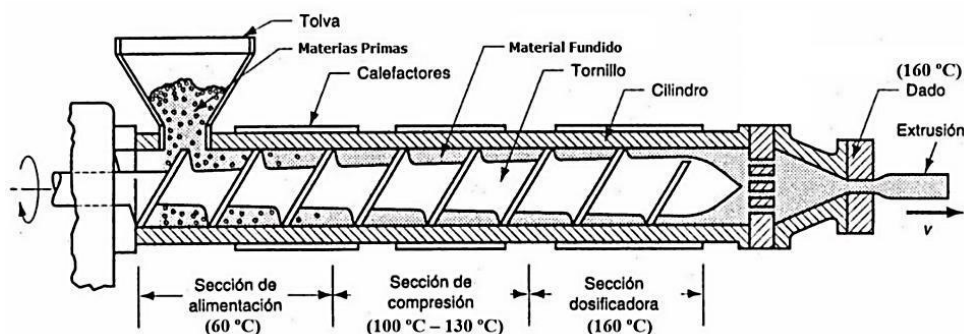
La cocción por extrusión consiste en el calentamiento de los ingredientes, acompañado de mezclado y cizallamiento, utilizando elevadas presiones (hasta 20 MPa) y temperaturas (hasta 200°C), con las consecuentes modificaciones fisicoquímicas del material y su calidad (6). En la Tabla 1 se resumen las condiciones típicas de extrusión de harinas de maíz con sus variables características, y los cambios físicos y químicos que tienen lugar. Es interesante comparar las condiciones en las que se efectúa la extrusión de maíz para la preparación de hojuelas, con respecto las del método tradicional. Este último consiste en la cocción de los *grits* en exceso de agua a 121 °C y 230 KPa por 2h aproximadamente, luego se realizan las etapas de temperado (que puede llegar hasta 24h), laminado y tostado. La extrusión se desarrolla a temperaturas y presiones mucho más elevadas, y en tiempos muy cortos, de 1,5 minutos, como se indica en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Condiciones de elaboración características del proceso de extrusión de harinas de maíz

Etapa	Temperatura	Contenido de agua	Transformaciones físicas	Reacciones químicas
1ra sección del extrusor	60 °C	14 %	Transición vítrea	
2da sección del extrusor	100 °C – 130 °C		Dstrucción de cuerpos proteicos	Pardeamiento
3ra sección del extrusor	160 °C	2-3 %	Gelatinización parcial del almidón	Desarrollo de aroma
	Tiempo de residencia: 1.5 min			Dextrinización parcial del almidón
Laminado, Tostado (opcional)				Hidrólisis de azúcar
Almacenamiento	25 °C (oscuridad, N <sub>2</sub> )	2-3 %		Oxidación lipídica

Se han desarrollado diferentes tipos de extrusores, de simple y doble tornillo, con longitudes y diámetros de tornillo variables, en configuraciones de co-ó contra-rotación. Durante el proceso, se realiza la alimentación mecánica o manual de la mezcla de ingredientes hacia un tubo que está sometido a calentamiento, esta alimentación puede estar forzada por un pistón. En el interior del tubo del extrusor se encuentran uno o dos tornillos que producen la mezcla y cizallamiento del material

incrementando la presión y aplicando energía mecánica. Finalmente, el material a presión y caliente atraviesa una boquilla de diámetro muy pequeño para salir del extrusor. La boquilla de salida puede estar acompañada de accesorios y cuchillas para generar los distintos tamaños y formas de los productos (Figura 2). Como consecuencia de la diferencia de presión entre el interior del extrusor y la presión ambiental, y ayudada por el vapor de agua generado durante el calentamiento, se produce la expansión del producto a la salida del equipo. La cabina de calentamiento suele estar dividida en secciones, con sus respectivos controles de temperatura. Del mismo modo, pueden controlarse las revoluciones del o los tornillos para generar diferentes velocidades de rotación. La combinación de los distintos parámetros del proceso determina las propiedades del producto final. Las variables que normalmente se modifican durante la extrusión son la humedad inicial de la mezcla de harinas, la temperatura de las distintas zonas de calentamiento, la velocidad de rotación del o los tornillos, la presión o el torque ejercidos, entre otras. Será necesario ajustar las condiciones de cada una de estas variables para obtener las características deseadas en el extruido (7).



**Figura 2.** Esquema de extrusor de simple tornillo (Fuente: [www.fido.palermo.edu](http://www.fido.palermo.edu), con modificaciones)

Durante el calentamiento y cizallamiento del material, ocurren diversos procesos físicos y químicos, con consecuencias a nivel mecánico y estructural, tales como la gelatinización del almidón, desnaturalización de proteínas, cambios de coloración por pardeamiento y caramelización o destrucción de pigmentos, inactivación de compuestos anti-nutricionales, entre otros, según lo indicado en la Tabla 1. Algunos de los cambios más importantes involucran al almidón, como la ruptura de gránulos, la fusión de cristales, la degradación molecular o despolimerización, atravesando un estado fundido homogéneo, normalmente llamado "termoplástico". Estos procesos generan la estructura del material en formación. Estas transformaciones se asocian tanto a componentes térmicos como mecánicos: cuando la temperatura es superior a la temperatura de gelatinización del almidón ( $T_m$ ), ocurre la fusión de las zonas cristalinas, sin embargo, la degradación molecular ocurre con el aporte de la energía mecánica a través del cizallamiento que favorece la ruptura de las cadenas y dextrinización. Como consecuencia de esto último, se produce una disminución en la viscosidad de la pasta. Las elevadas temperaturas favorecen cambios moleculares en las proteínas, como ruptura de cuerpos proteicos y formación de agregaciones de distintas subunidades por enlaces covalentes (disulfuro) y no covalentes (atracciones hidrofóbicas, iónicas y puentes de hidrógeno), asociaciones y disociaciones que conllevan a la desnaturalización y formación de redes que dan forma y estructura al material en formación. Además de la temperatura, el agua juega un rol importante ya que influye en la movilidad molecular de las proteínas y su entrecruzamiento (8). Las altas temperaturas y vaporización del agua favorecen el desarrollo de reacciones de pardeamiento no enzimático, con la formación de productos de Maillard, como consecuencia de la condensación de grupos amino con azúcares reductores, y la caramelización de azúcares. Si bien estas reacciones disminuyen el valor nutricional, están asociadas a la formación de compuestos responsables del *flavor* agradable y producen el color típico. Si las temperaturas del tratamiento son muy intensas o la exposición es durante un tiempo prolongado, mayor cantidad de productos pardos se formarán; de allí que la coloración parda de un alimento extruido puede ser utilizado como indicador de la intensidad del tratamiento. De manera analítica, la furosina y el hidroximetilfurfural (HMF) son algunos de los compuestos utilizados como referencia para medir el grado de pardeamiento de los alimentos (9, 10).

Actualmente, una gran cantidad de materias primas son utilizadas como ingredientes para el desarrollo de alimentos extruidos. La versatilidad de la técnica permite la fácil incorporación de dichos materiales. Se utilizan harinas provenientes de distintos cultivos: maíz, soja, arroz, avena, amaranto, cebada, trigo, chí, lentejas, garbanzos, frijoles, quínoa. La combinación de cereales con leguminosas ha resultado exitosa para lograr alimentos con un balance adecuado de aminoácidos esenciales. Sin embargo, también se han incorporado otras fuentes proteicas, como aislados y concentrados de suero lácteo. Cuando el objetivo es mejorar el contenido de fibra y/o el contenido de compuestos antioxidantes, las opciones aumentan ya que se ha utilizado una amplia variedad de gomas, pectinas, inulina, así como cáscaras, tallos y sub-productos o "residuos" de otras líneas de producción (11, 12, 13).

## 2. El maíz como ingrediente en alimentos extruidos: análisis de la materia prima y caracterización física, química y mecánica de los productos

Los granos de maíz (*Zea mays*) pueden someterse a dos tipos de molienda, a partir de la cual se obtienen diferentes productos: molienda seca y molienda húmeda. La molienda seca abarca las industrias que producen harinas y sémolas y, por otro lado, donde se elaboran productos para copetín o *snacks* y cereales para desayuno. Algunos subproductos de estas industrias son el germen para obtener aceite, el *gluten feed* y el *gluten meal* destinados para alimentación animal y el *grit* cervecero que se utiliza en la elaboración de bebidas malteadas (14). En los procesos de extrusión, la harina de maíz proveniente de la molienda seca constituye una de las materias primas más utilizadas, por su bajo costo y la cantidad de productos derivados que pueden obtenerse. La composición centesimal promedio del grano de maíz es: 73,4 % de almidón, 4,4 % de lípidos, 9,1 % de proteínas, 1,4 % de cenizas, 1,9 % de azúcares y 9,8 % de carbohidratos extraíbles. El almidón está compuesto por dos polímeros de glucosa de elevado peso molecular: amilosa (27%) y amilopectina (73%). La amilosa es un polímero mayormente lineal constituido por moléculas de glucosa unidas por enlaces  $\alpha$  1-4, con pocas ramificaciones dadas por enlaces  $\alpha$  1-6. Los enlaces  $\alpha$  1-4 le imparten a la amilosa un giro gradual haciendo que tome forma de hélice, con un interior hidrofóbico. La amilopectina, en cambio, está formada por cadenas más cortas de glucosa, con elevado número de ramificaciones en enlaces  $\alpha$  1-6. La disposición e interacción entre estos polímeros genera estructuras organizadas en capas semicristalinas y amorfas alternadas. Por otro lado, se encuentran las proteínas de almacenamiento denominadas zeínas que son del tipo prolaminas. Se dividen en tres clases, (ricas en glutamina, leucina y aminoácidos hidrofóbicos),  $\beta$  (ricas en metionina) y  $\gamma$  (con elevada concentración de prolina)(15). Su concentración está asociada a la dureza del grano (16). En cuanto a los lípidos, el maíz presenta, en promedio, la siguiente composición: 12 % de ácido palmítico, 1,9 % de ácido esteárico, 32 % de ácido oleico y 51 % de ácido linoleico (17). Los procesos térmicos y mecánicos que ocurren durante la extrusión producen modificaciones en la composición y en las características y propiedades de los productos que se generan. De la intensidad y el control que pueda ejercerse sobre estos dependerán las características finales del producto, lo cual hace del estudio de las propiedades de los extruidos un conjunto de herramientas indispensables para el desarrollo de nuevos alimentos. Algunas de las determinaciones y propiedades físicas, químicas y mecánicas que se analizan en estos tipos de productos son: índice de absorción y solubilidad en agua, grado de expansión, densidad aparente, humedad final, color, propiedades mecánicas (dureza, fracturabilidad), grado de cristalinidad (DRX) y transiciones térmicas asociadas (DSC), interacción y relación con el agua (isotermas, determinaciones poblaciones de protones por H-RMN). Otros estudios más sofisticados incluyen análisis microscópicos (SEM, CLSM), análisis espectroscópicos (FT-IR, Raman, XPS), caracterización macroscópica a través de imágenes, entre otras (Figura 3).



**Figura 3.** Tipos de análisis que se realizan de las diferentes propiedades y características de alimentos extruidos

## 2.1 Índice de absorción (IAA) y solubilidad en agua (ISA)

Dependiendo el grado de cocción y las características del almidón, se generarán distintas relaciones con el agua, asociadas a los procesos de gelatinización y dextrinización. A temperaturas más altas y mayor contenido de agua, hay una disminución en la viscosidad de la pasta, se produce la apertura de las cadenas de amilosa y amilopectina, permitiendo el ingreso e interacción entre las moléculas de glucosa con el agua, promoviendo la fusión de cristales y gelatinización del almidón. Como consecuencia, se producirá una mayor absorción de moléculas de agua, generando IAA mayores. Además del almidón, las proteínas también cumplen un rol importante, ya que pueden formar geles y retener moléculas de agua a través de sus grupos hidrofílicos, aunque esto se encuentre limitado por el estado de la molécula tras el calentamiento. Por el contrario, cuando el contenido de agua no es suficiente o la energía mecánica entregada es muy alta se favorece el proceso de dextrinización respecto de la gelatinización, en este proceso hay mayor degradación del almidón y se producen cadenas cortas de glucosa que pueden liberarse al medio acuoso, donde se solubilizarán. A diferencia del índice anterior, el ISA puede utilizarse como referencia para conocer el grado de degradación molecular del almidón (18).

## 2.2. Grado de expansión

En los productos extruidos la expansión puede medirse de manera longitudinal, seccional o volumétrica. La cantidad y estado de las proteínas y principalmente del almidón determinan el grado de expansión de estos alimentos. De modo general, la expansión se reduce con el aumento del contenido proteínas, que aportan rigidez a la estructura, pero se incrementa con niveles crecientes de almidón. Como en el caso del IAA, el grado de gelatinización del almidón influirá directamente en la expansión; a mayor gelatinización, mayor será la expansión. El vapor de agua también cumple un rol importante ya que, con el cambio de presión a la salida del equipo, se favorece la expansión impulsada por el vapor. Como en todas las características, no sólo la composición sino también las condiciones del proceso repercuten en esta propiedad. En particular, aquellas que promuevan la gelatinización del almidón, favorecerán la expansión. Velocidades de rotación de tornillo elevadas ejercen mayor energía mecánica y consecuente cizallamiento del material, temperaturas altas indican mayor calor entregado al sistema y mayores contenidos de humedad permiten que haya mayor cantidad de agua disponible para interactuar con el almidón, así como mayor número de burbujas formadas. Todas estas condiciones impulsan la gelatinización del almidón y, en consecuencia, promoverán la expansión del producto. Respecto al agua, sin embargo, algunos autores reportan que los incrementos en el

contenido de humedad inicial afectan de manera negativa a la expansión, aunque esto también depende en conjunto con el resto de las variables de extrusión (19).

### 2.3. Densidad aparente

El cálculo de la densidad se define como la relación entre la masa y el volumen del producto. De esta manera, cuanto mayor sea el volumen del extruido, menor será su densidad. Así, existe una relación inversamente proporcional entre estas propiedades físicas. Por lo tanto, un producto expandido tendrá una menor densidad aparente. Por esta razón, los factores que favorezcan la expansión (elevadas temperaturas, velocidades de rotación de tornillo y humedades iniciales), generarán valores de densidad aparente bajos. En particular para las revoluciones del tornillo, algunos autores justifican que la velocidad de rotación reduce la viscosidad e incrementa la elasticidad de la mezcla, produciendo productos con baja densidad (19).

### 2.4. Humedad final

La humedad final del producto se puede relacionar directamente con determinadas características mecánicas y texturales, así como también es importante para establecer la estabilidad y el período de vida útil. Los factores que determinan en mayor medida la humedad del alimento son la temperatura de extrusión y la humedad inicial de la materia prima; cuanto menor sea la temperatura de trabajo y mayor la humedad de la mezcla, la humedad final será más alta, generando un producto menos atractivo sensorialmente y más proclive al desarrollo microbiano y otras reacciones de deterioro. De esta manera, la humedad final define en gran medida la calidad del alimento extruido (19).

### 2.5. Color

Además de la humedad final, otro factor determinante de la calidad de los productos extruidos es el color. Este parámetro se utiliza como indicador de la intensidad del tratamiento térmico y puede relacionarse, por otro lado, con el desarrollo de productos de pardeamiento, como furosina e hidroximetilfurfural. Si bien el tiempo de exposición del material a las temperaturas elevadas es corto, la susceptibilidad de los pigmentos o la facilidad del desarrollo de reacciones de pardeamiento generan cambios en este atributo. Además, algunos de los productos de pardeamiento que se forman repercuten directamente en el *flavor* del alimento (20). El establecimiento de paneles sensoriales entrenados puede utilizarse para medir el color y da una idea directa de la percepción de los consumidores, aunque es muy difícil de ejecutar, ya que para establecer determinaciones útiles es necesario realizar el entrenamiento específico de los panelistas. Una de las formas más utilizadas para realizar una evaluación estandarizada del color de un alimento es aplicar la teoría de colorimetría de reflectancia triestímulo y expresar los resultados en el espacio de color CIE Lab que se define utilizando los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ . El parámetro  $L^*$  se refiere a la luminosidad de la muestra y toma valores entre 0 (negro) y 100 (blanco), el parámetro  $a^*$  describe las variaciones del rojo (+120) al verde (-120) y  $b^*$  toma valores desde el amarillo (+120) al azul (-120)(21). El color puede medirse directamente en forma instrumental mediante un colorímetro o a través de imágenes obtenidas con cámaras digitales y posterior análisis en softwares (por ejemplo, Photoshop). En estas determinaciones se debe controlar el efecto de la luz ambiente o artificial, por lo que suelen utilizarse cabinas preparadas para tal fin, con condiciones de iluminación y temperaturas establecidas, además de parámetros de obtención de las imágenes, distancia al objetivo, entre otras. Se ha establecido la correlación entre ambas técnicas para evaluar el color de alimentos instrumentalmente (22). En cuanto a los efectos de la extrusión sobre estos parámetros, las elevadas temperaturas y velocidades de rotación de tornillo producen disminuciones considerables del valor  $L^*$  y mayores valores de  $a^*$  y  $b^*$ . Esto se debe a que las reacciones de pardeamiento no enzimático y de destrucción de pigmentos se favorecen con la temperatura y a que la fricción o cizallamiento permite un fraccionamiento que facilita la exposición de grupos reactivos al pardeamiento, como los grupos amino de las proteínas (23).

### 2.6. Propiedades mecánicas

Los texturómetros, que registran la fuerza aplicada en función del desplazamiento, son los equipos más utilizados para determinar las propiedades mecánicas de los productos extruidos. Es requisito que se use un número grande de muestras para poder tener valores adecuados que representen las verdaderas

características del producto. Además, se deben respetar las dimensiones de las muestras y las condiciones en que se realizan las determinaciones. Existe una amplia variedad de *tests* que pueden aplicarse para evaluar las diferentes propiedades. Algunos simulan los procesos de masticación, por lo que pueden correlacionarse con la percepción sensorial que experimentan los consumidores.

La celda Kramer es uno de los accesorios utilizados, donde una serie de cuchillas atraviesan a las muestras que se encuentran contenidas en una celda pequeña. La distancia entre las cuchillas y las muestras, así como la velocidad del test se definen experimentalmente o siguiendo recomendaciones de otros autores para cada alimento en particular. De este *test* se obtienen gráficas de fuerza vs desplazamiento y los picos presentes se asocian a la fuerza de corte necesaria para atravesar las muestras. Cuando se comprime un alimento crujiente como los extruidos, se puede observar un aumento lineal de la fuerza aplicada hasta que ocurre el primer evento de fractura. El movimiento y reacomodación de los fragmentos que resulta en una caída de la fuerza aplicada. Este evento se propaga por el material a muy altas velocidades produciendo el clásico sonido que se asocia con la crocancia. A medida que la muestra se comprime aún más, la fuerza vuelve a aumentar hasta que ocurra el siguiente evento de fractura. Es decir, una caída de fuerza acompaña a cada evento de fractura. Los picos de fuerza observados en una curva de fuerza-deformación corresponden a cada evento de fractura y la altura del pico depende de las propiedades estructurales del material, como la distribución del tamaño de las burbujas y el grosor de la pared de la burbuja. Las diferencias en los valores resultantes y las formas de las curvas entre las muestras se deben principalmente a la composición y estado de sus componentes, así como a las condiciones en las cuales fueron elaboradas. En las muestras más expandidas, y por lo tanto de menor densidad aparente, suele requerirse menor fuerza de corte para atravesarlas y se presentan varios picos, asociadas a las distintas burbujas de aire delimitadas por paredes rígidas, con un perfil de fuerzas más ancho; en cambio, en aquellas más compactas o con mayor contenido de fibra, en general la energía requerida suele ser mayor y las gráficas son más uniformes (24). Otros tipos de *tests* incluyen el uso de distintas clases de cuchillas o guillotinas de formas variadas, así como celdas de carga de distinto tamaño y peso, con especificaciones particulares en cada caso. Algunos de ellos son *tests* de corte, de punción, de compresión, de cizallamiento, donde se analizan propiedades mecánicas como dureza, fracturabilidad, adhesividad, gomosidad, etc. (25).

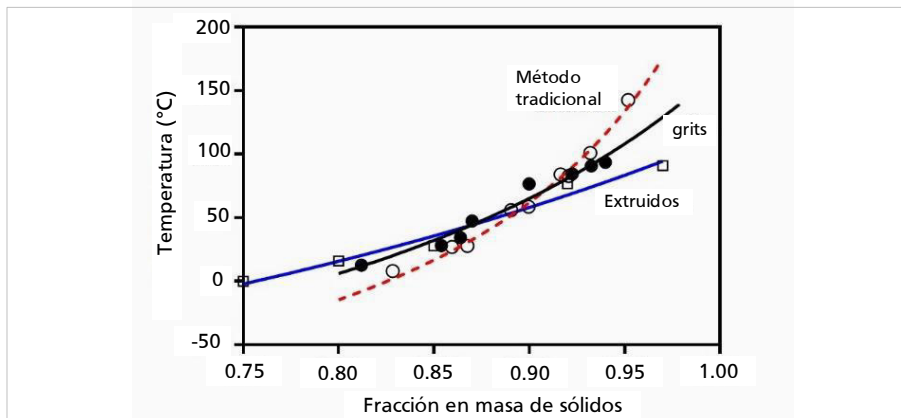
Además, puede evaluarse el sonido que se genera durante el rompimiento de las muestras, a través de sensores acústicos. Es necesario realizar estas determinaciones en cabinas aisladas donde los ruidos ambientales sean descartados, además del propio sonido del equipo. Así pueden asociarse determinadas frecuencias y amplitudes de señales con características como dureza, crocancia y crujencia. A determinadas frecuencias, amplitudes mayores se asocian a texturas más crocantes. En relación a la expansión, los productos con mayor volumen suelen presentar mayores amplitudes en comparación con productos menos expandidos y más duros. A nivel general, los alimentos crocantes generan sonidos más fuertes y agudos a niveles de alta frecuencia que aquellos productos crujientes (26).

## 2.7. Isotermas de sorción de agua, transiciones térmicas y grado de cristalinidad

Como se mencionó anteriormente, el proceso de extrusión permite una mezcla, cocción y obtención de productos de baja humedad, favorecido por el uso de elevadas presiones. Esta técnica induce la fusión y vitrificación del material hacia el final del proceso, con una rápida evaporación del agua a la salida del equipo, el enfriamiento de la estructura y la formación de una espuma sólida se produce como consecuencia de la diferencia de presión y temperatura respecto a las condiciones ambientales. Luego del enfriamiento, el material obtenido es una estructura sólida amorfa y un material vítreo en un estado de no-equilibrio, que se puede modificar eliminando agua o mediante un enfriamiento rápido. El agua remanente en el material juega un rol fundamental en la calidad final, ya que influye en la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), que está directamente relacionada con la estabilidad. Además del agua, existen otros factores involucrados en definir el rango de temperaturas en que ocurre la transición. La  $T_g$  se define como la temperatura a la cual un material amorfo pasa de un estado vítreo a otro denominado líquido sobre enfriado. La transición vítrea implica el ablandamiento del material vítreo al aumentar el contenido de agua, pero también existen otros procesos, como el envejecimiento físico, que afectan las propiedades de la textura en el estado vítreo. En la Figura 4 se muestran las temperaturas de transición vítrea de *grits* de maíz, y de hojuelas de maíz obtenidas por extrusión o por el método tradicional, en



función de la fracción en masa de sólidos. Es interesante notar que, a pesar de su historia térmica y mecánica tan diferente, estos materiales tienen temperaturas de transición vítrea bastante similar, lo que facilita las predicciones. Además, dados los valores de  $T_g$  en condiciones ambientales normales y a bajas humedades los productos se mantienen por debajo de la curva de  $T_g$ , lo que significa que se encuentran formando un vidrio.



**Figura 4.** Temperaturas de transición vítrea (obtenidas por DSC) de *grits* de maíz y hojuelas obtenidas por extrusión o laminados

Dado que estos productos, vítreos a temperatura ambiente, no están en equilibrio termodinámico a temperaturas por debajo de su temperatura de transición vítrea, pueden sufrir cambios físicos cuando sus propiedades termodinámicas (por ejemplo, entalpía, volumen libre) disminuyen para alcanzar un estado de menor energía. Dicha evolución está asociada con un proceso de envejecimiento físico que ocurre durante el almacenamiento. El estado estructural de un material vítreo depende de la historia térmica del vidrio a partir de su procesamiento y almacenamiento por debajo de  $T_g$ . Una de las maneras más efectivas para evaluar el efecto del agua en la  $T_g$  consiste en construir una curva de variación de  $T_g$  vs contenido de agua. Como primer paso puede construirse una isoterma de sorción de agua del producto extruido. Para esto se expone el material a atmósferas de humedad controlada hasta su equilibrio (por ejemplo, con soluciones saturadas de sales específicas que imparten un determinado valor de actividad de agua ( $a_w$ )), a temperatura constante. Evaluando el contenido de agua en cada sistema se puede construir y modelar matemáticamente la isoterma de sorción, como la curva resultante de la combinación del contenido de agua versus actividad de agua. Posteriormente, mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) es posible evaluar la temperatura a la cual ocurre la transición vítrea para cada sistema en equilibrio a las distintas  $a_w$ . El efecto plastificante del agua produce que a medida que aumenta el contenido de agua, disminuya el valor de la  $T_g$ . De igual manera, se puede establecer el efecto de otros ingredientes, como el contenido de azúcar, sobre este parámetro (27).

### 3. El proceso de extrusión en el diagrama de estado

Además de determinar la temperatura de transición vítrea, mediante DSC se pueden establecerse los rangos de temperatura donde ocurren procesos como la gelatinización de almidón, desnaturalización de proteínas, fusión de lípidos, etc.

Como se discutió en el capítulo sobre calorimetría, si la cocción durante la extrusión fue incompleta, en el termograma obtenido se verá una transición asociada a la gelatinización del almidón nativo remanente. El área bajo la curva y la entalpía del proceso permitirán cuantificar y determinar el grado de cocción. De manera similar puede conocerse el grado de retrogradación del mismo durante el almacenamiento. Estos resultados se pueden asociar con el grado de cristalinidad de la muestra, determinada mediante difracción con rayos X, donde se puede establecer la comparación entre el alimento antes y después del proceso de extrusión y así conocer el grado de cocción del almidón, además de modificaciones específicas asociadas al proceso térmico de los distintos tipos de cristales de almidón presentes en la muestra. Por espectroscopía FT-IR se pueden establecer correlaciones entre la absorbancia a ciertos números de onda y el grado de

cristalinidad del almidón. De esta manera hay una complementariedad en estas tres técnicas de análisis para conocer el estado del almidón en productos extruidos (26, 28).

La gráfica de las temperaturas características de un material, incluyendo las  $T_g$  en función de la fracción en masa de sólidos se conoce como diagrama de fases suplementado, y es muy útil para realizar interpretaciones y predicciones acerca del comportamiento de los materiales, y establecer condiciones de proceso. En la Figura 5 se muestra un diagrama de fases suplementado para las harinas de maíz, con las temperaturas de gelatinización ( $T_m$ ), de transición vítrea ( $T_g$ ) y la zona de reacción de las proteínas. Además, se indican las distintas etapas del proceso. La harina se encuentra inicialmente en una zona vítrea, al ingresar al extrusor se calienta y sobrepasa la  $T_g$ , llegando a una zona donde ocurre la gelatinización parcial del almidón (es parcial debido al bajo contenido de agua). En las últimas etapas de la extrusión, las altas temperaturas y presiones provocan la ruptura de cuerpos proteicos y las proteínas entran en una zona de fusión y reacción. Al salir del extrusor el material se expande por la diferencia de presión y al enfriarse queda formando una estructura vítrea. La línea gris indica la zona donde cesa el movimiento de burbujas, que es aproximadamente a una temperatura 30 °C superior a  $T_g$ . Este tipo de diagrama nos permite interpretar las observaciones que se realizan mediante microscopía electrónica, por ejemplo, que verifican la destrucción de cuerpos proteicos y la gelatinización parcial de almidón. También, establecer la zona donde el material se estabiliza porque cesan los movimientos de las burbujas, y las condiciones de contenido de agua o temperaturas necesarias para lograr el material que se desea.

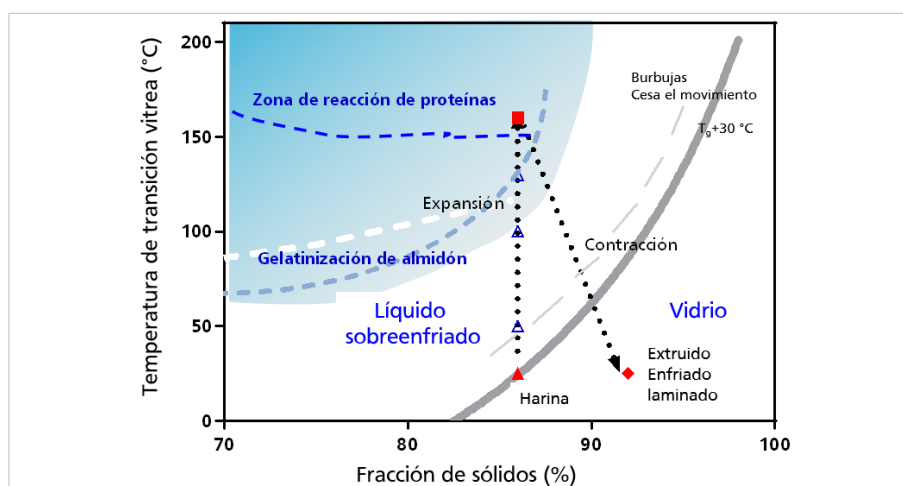


Figura 5. El proceso de extrusión de la harina de maíz en el diagrama de fases y estado

#### 4. La incorporación de otros cereales en las formulaciones para extrusión: ventajas y desventajas

La deficiencia en aminoácidos esenciales en el maíz, la necesidad de fortificar a los extruidos con fibra, así como la búsqueda de conseguir productos más expandidos o con diferentes características físicas, ha llevado a la complementación de los productos de maíz con otras harinas para ampliar la variedad de alimentos obtenidos, con características diferenciales.

Uno de los casos más comunes y analizados en este sentido es la mezcla maíz-quínoa. En comparación con los productos hechos 100 % de maíz, la incorporación de harina de quínoa aumenta los niveles de fibra, cenizas, proteína y también de lípidos. Si bien el proceso de extrusión reduce en cierta medida los valores, por la exposición a la temperatura y dada la facilidad de que ocurran ciertas reacciones de deterioro, ya que las semillas de quínoa tienen cantidades significativas de estos nutrientes, su incorporación en las formulaciones generará mayores cantidades de ellos, incluso luego de la extrusión. En particular para el perfil de aminoácidos esenciales, la incorporación de 30 % de quínoa aumenta en un 50 % el contenido de lisina, frente a la formulación hecha únicamente con maíz. De manera

similar, los niveles de ácido aspártico, treonina, glicina, valina y arginina también resultan mayores con la incorporación de quínoa (29). Sin embargo, la incorporación de proteínas afecta las propiedades físicas, ya que se disminuye la expansión y por lo tanto aumenta la densidad, lo que resulta en una estructura más compacta. Al poseer mayor cantidad de lípidos, hay menor almidón disponible, que es el principal componente que define la expansión del producto. Los lípidos generan una masa más suave y blanda que no tiene la fuerza suficiente para expandir de manera correcta. Esto repercute también en las características mecánicas, donde un material menos expandido, más denso y compacto, presenta mayor dureza. En cuanto a la apariencia microscópica, la incorporación de quínoa genera celdas más pequeñas y compactas, algunas rotas, distribución de burbujas de aire menor uniformes, con una textura más áspera (30).

La combinación gramíneas-leguminosas o gramíneas-legumbres es la ideal para la complementación en el perfil de aminoácidos y fortificación de minerales. La incorporación de un 15 % de harina de arvejas, por ejemplo, incrementa los niveles de proteína y fibra, aunque no genera cambios significativos en cuanto a cenizas. El contenido de lípidos aumenta, pero no en gran medida. En cuanto al perfil de aminoácidos, la adición de arvejas reduce las cantidades de leucina, pero continúa por encima a los niveles sugeridos por FAO; en la lisina los niveles también aumentan, pero no se alcanzan las cantidades recomendadas, por lo que la adición debería ser mayor al 15 % para que se logre el resultado adecuado. A nivel general, los contenidos de aminoácidos aumentan con la adición de harina de arveja, en comparación a las formulaciones controles exclusivamente de maíz. Respecto a las características físicas, el porcentaje de incorporación de arveja no genera efectos significativos respecto a la expansión o densidad en comparación con el control. Tampoco se encuentran diferencias frente al control en lo referente a la digestibilidad de proteínas *in vitro* o el contenido de polifenoles (31).

Otro ejemplo de complementación con leguminosas es la combinación maíz-garbanzos. Estos son fuente de proteínas, con cantidades importantes de vitaminas del grupo B, ácidos grasos insaturados y ciertos minerales. La incorporación de 21 % de esta leguminosa a la formulación genera un producto con 20 g de proteínas, con contenidos de aminoácidos esenciales superiores a los recomendados por la FAO/OMS, salvo para el triptófano, con una digestibilidad del 84,5 %. Estas características lo hacen adecuado para el desarrollo de formulaciones alimentarias destinadas a niños en edad de crecimiento (32).

La utilización de cultivos con elevado contenido lipídico, como es el caso de la chía, también se ha reportado. Estas semillas contienen entre 25 % y 40 % de lípidos y hasta 68 % de ácido linolénico, también conocido como omega-3, que es esencial. Su contenido proteico también es importante, entre 19 % y 23 %, con un perfil de aminoácidos esenciales adecuado, en particular leucina, lisina, valina e isoleucina. Su incorporación, únicamente en un 5 %, genera productos menos expandidos, y por lo tanto con mayor densidad, en comparación a las formulaciones exclusivamente de maíz. Esto se debe a que los lípidos producen un efecto lubricante en la masa, disminuyendo la fricción y el torque del extrusor, generando una menor presión, que repercute directamente en la expansión (33). En cuanto a la dureza, la formulación con chía presenta menores valores que el control. Como la dureza se define a partir de la interacción entre biopolímeros, principalmente carbohidratos y proteínas que dan la estructura, la incorporación de lípidos pudo haber generado una disrupción entre ellos. Esto explica la menor expansión y los valores inferiores de dureza. En conjunto con esta determinación, la detección y duración de los sonidos generados durante la penetración de la cuchilla se utilizan para establecer la crocancia del producto, relacionados a la ruptura de las cavidades. Las muestras que contienen chía resultan más crocantes, donde sus cavidades se rompen de manera progresiva en comparación al control, que es más quebradizo y por lo tanto se desintegra más rápidamente (34).

Una de las combinaciones más utilizadas y estudiadas es la mezcla maíz-soja. Esta leguminosa contiene cantidades significativas de proteínas y lípidos y un porcentaje bajo de carbohidratos. La incorporación de niveles crecientes de harina de soja en las formulaciones de maíz produce mayor volumen específico, aunque de esto también depende la velocidad de rotación del tornillo y la humedad inicial de la mezcla. Respecto a la expansión, el uso de hasta un 15 % de soja, disminuye el grado de expansión, pero los niveles son máximos e incluso superiores a la formulación exclusiva de maíz con la incorporación de un 30 % de harina de soja. A pesar de esto, su incorporación disminuye significativamente la dureza de las muestras, aunque las propiedades mejoran con la adición de agua, ya que es necesaria la hidratación adecuada y suficiente de las proteínas que se incorpora para lograr la estructura del producto. Las proteínas de soja pueden actuar como emulsionantes de alta calidad entre materiales hidrofílicos e

hidrófobos, exponiendo sus grupos afines a las fases correspondientes. Como resultado, con una alta concentración de harina de soja, los poros formados en los productos extruidos después de atravesar el dado de salida del extrusor son más pequeños y más uniformes que aquellos donde la incorporación de soja es menor o nula. Al mismo tiempo, el grosor de la pared de los poros disminuye cuando aumentan los niveles de soja incorporados, de allí la disminución en los valores de dureza (35).

Algunos pseudocereales cultivados en Sudamérica que se han analizado como alternativas para la formulación de alimentos extruidos, y en búsquedas de alternativas de consumo para aquellas personas intolerantes al gluten, además de la quínoa, son el amaranto, kañiwa y kiwicha. Estos cultivos son fuente de proteínas, fibra, ácidos grasos insaturados y compuestos bioactivos. Se han hecho estudios donde se comparan los efectos de incorporación de 20 %, 35 % y hasta 50 % de amaranto y kañiwa en formulaciones a base de maíz. En cuanto a las propiedades físicas, el aumento en los niveles de sustitución con amaranto produce alimentos menos expandidos y rígidos, mientras que con kañiwa se mantienen los valores de rigidez, aunque la expansión también resulta menor. La incorporación de estos pseudocereales reduce los índices de absorción y solubilidad en agua, en ambos casos. Respecto a la porosidad, porcentajes crecientes de los pseudocereales no generan modificaciones en los valores, pero sí se reducen los tamaños de los poros, principalmente en el caso de kañiwa; es decir se producen más poros, pero de menor tamaño. Del mismo modo, las paredes de los poros se engrosan con el aumento del contenido de los pseudocereales, principalmente con kañiwa. Mediante análisis sensorial con paneles entrenados se observó que las mezclas con kañiwa son más crocantes que las que contienen amaranto, pero que esta característica disminuye con el aumento del porcentaje de sustitución. A su vez resultan más dulces los que contienen kañiwa en comparación con las formulaciones con amaranto. Los que poseen kañiwa resultan más duros y adhesivos y esta dureza aumenta con el contenido de harina sustituida (36).

## 5. Utilización de extractos naturales y subproductos vegetales como complemento en la formulación: agregado de compuestos bioactivos y revalorización de materiales

En el último tiempo, el interés y los hábitos de los consumidores en el campo de los alimentos se han modificado considerablemente. Hoy en día, los consumidores demandan productos que combinen una apariencia interesante, una textura crujiente altamente aceptable y un sabor atractivo, pero con ingredientes nutritivos y/o funcionales. En particular, fibra dietética, proteínas, micronutrientes o compuestos con alta actividad antioxidante, tales como los polifenoles son los más requeridos. En ese sentido, los productos extruidos a base de maíz resultan una opción viable para cubrir dicha demanda. Su producción está muy desarrollada y presentan características texturales altamente aceptadas, aunque no son ricos en compuestos bioactivos y necesitan una adecuada suplementación mediante la incorporación de ingredientes funcionales novedosos. Para tal fin se han analizado diferentes posibilidades, dentro de las cuales se destacan la incorporación de extractos provenientes de fuentes naturales, así como subproductos agroindustriales (cáscaras, semillas, tallos, etc.), con el doble objetivo de mejorar el perfil nutricional de la formulación y revalorizar estos materiales comúnmente denominados residuos y que generalmente son desechados sin aprovechar sus propiedades. Al mismo tiempo, no debe perderse de vista la necesidad de que estos alimentos resulten con características físicas, mecánicas y sensoriales adecuadas.

Un ejemplo es la incorporación de tallos de alcaucil, ricos en inulina y derivados, así como fructo-oligosacáridos y polifenoles, o la pulpa de calabaza, fuente de pectina, carotenoides y compuestos polifenólicos. En comparación con el control, la incorporación de estos materiales genera disminución en la expansión, independientemente de las condiciones de extrusión. Esto se debe a los elevados niveles de fibra de estos ingredientes, que limitan el grado de hidratación y por lo tanto gelificación del almidón y disminuyen la viscosidad de la masa, lo cual repercute directamente en el grado de expansión. Estos componentes, junto con los azúcares, son los responsables de los aumentos en los valores de los índices de absorción de agua y disminución en los de solubilidad. A nivel sensorial, la intensidad de color aumenta con la adición de estos productos, generando materiales más oscuros, en particular con la pulpa de calabaza. El color medido instrumentalmente coincide con lo determinado a través de un panel

sensorial: la adición de los ingredientes reduce el valor de la coordenada  $a^*$ , intensificándose la diferencia con el aumento de la temperatura de extrusión, e incrementa los valores de la coordenada  $b^*$ , demostrando que se tornan más amarillas. La luminosidad es mayor en las muestras controles. Estas modificaciones pueden deberse al mayor contenido de azúcares en estos materiales que promueven reacciones de pardeamiento, ligado a productos más oscuros y amarillentos y de menor homogeneidad. Los polifenoles y carotenoides incorporados pueden tener un rol importante en la modificación de estas coordenadas de color. En cuanto a la textura, la dureza es similar entre las muestras control y las adicionadas con tallos de alcauil y pulpa de calabaza, con valores aceptables de crocancia, independientemente de las condiciones de extrusión. La solubilidad de los *snacks* a nivel bucal es mayor con la adición de los tallos de alcauil, pero con la incorporación de ambos productos la adhesividad disminuye, aumentando la calidad del extruido. Respecto a los compuestos bioactivos, el contenido de polifenoles totales se incrementa considerablemente con la adición de estos ingredientes, principalmente en el caso de calabaza (entre 6 y 13 veces mayor). De manera similar, la actividad antioxidante también se incrementa significativamente en comparación con el control, aunque en mayor medida para la adición de alcauil. El aumento en la velocidad de rotación de tornillo favorece estos valores, ya que se estima que genera una mayor disrupción del material celular, promoviendo la liberación de los compuestos con propiedades antioxidantes, además de favorecer la formación de melanoidinas y otros compuestos pardos que también influyen en estas determinaciones (37).

Pequeñas cantidades de algunos ingredientes pueden generar grandes modificaciones. La incorporación de ciertos materiales puede retardar o limitar ciertas reacciones de deterioro, como lo es la oxidación lipídica, que se ve favorecida en los alimentos extruidos por ser muy porosos, con gran superficie de contacto dada por la expansión y de bajo contenido de humedad, aun cuando su contenido lipídico sea bajo. Además, los antioxidantes propios de las materias primas pueden destruirse durante el calentamiento térmico en el proceso de extrusión, aumentando las posibilidades de la ocurrencia de la oxidación. Como consecuencia se generan compuestos que afectan la calidad sensorial y organoléptica, con la formación de *off-flavors*. Se necesita, entonces, la incorporación de antioxidantes provenientes de otras fuentes para disminuir el ranciamiento. En la búsqueda de alternativas a los antioxidantes sintéticos, se propone el uso de fuentes naturales, como polvos secados por spray de extractos provenientes de ginkgo, cebolla, cáscara de papa y salvado de trigo. Con la incorporación de sólo 2 % en formulaciones a base de maíz se produce una mayor expansión en el caso del ginkgo y menor con salvado de trigo, mientras que con el resto no hay diferencias respecto al control. De manera inversa, la densidad relativa es la menor en el caso del ginkgo y máxima y sin diferencias con el control para el salvado de trigo. Respecto al color, el agregado de ginkgo y cáscara de papa genera muestras más oscuras (menor  $L^*$  y  $b^*$  y mayor  $a^*$ ); el resto no presenta grandes diferencias con el control. En cuanto al contenido de polifenoles y actividad antioxidante, los productos conteniendo ginkgo presentan el mayor valor de compuestos bioactivos, pero no existen diferencias en cuanto a la actividad antioxidante con respecto al control; es decir, no hay una correlación entre ambas técnicas, lo cual puede indicar que en la determinación de actividad antioxidante existan otros compuestos que no sean polifenoles que estén interviniendo en el resultado. Sin embargo, en lo referido a la cuantificación de aldehídos provenientes de la oxidación lipídica (decanal, hexanal, nonanal, octanal) durante el almacenamiento de varias semanas se manifiesta el efecto protector de estos extractos, ya que, por ejemplo, con el salvado de trigo el contenido de aldehídos luego de 3 semanas es menor al control. Esto se mantiene luego de 6 semanas, donde además los extruidos con ginkgo, cáscara de papa y cebolla acumulan valores inferiores de aldehídos en comparación con la formulación exclusiva de maíz. El salvado de trigo protege de la oxidación lipídica en mejor medida que la formulación control hasta 11 semanas posteriores a su elaboración (38).

Además de la incorporación de propiedades funcionales, ciertos ingredientes pueden impartir colores distintivos y atractivos para los consumidores. Tal es el caso de las antocianinas, provenientes por ejemplo de frutos rojos, que aportan tonalidades rojizas o violetas, además de ser protectoras frente a la aparición de ciertas enfermedades cardiovasculares, cáncer, diabetes, entre otras. La incorporación de este tipo de frutos a formulaciones destinadas a extrusión se facilita cuando se encuentran en forma de polvos, evitando inconvenientes mecánicos debidos a las cáscaras/semillas que pueden afectar el rendimiento de los tornillos. La adición en un 1 % de polvos de arándanos, arándanos rojos, uvas y frambuesas a formulaciones a base de maíz genera grandes diferencias en sus características. Si bien el

grado de expansión y la densidad en todas las muestras es similar, el control resulta más luminoso y menos rojizo que el resto de las formulaciones, siendo la muestra con arándano la más oscura y con mayor tonalidad azulada. El contenido de fenoles solubles es mayor en todos los extruidos adicionados con polvos de frutas y esta diferencia es aún mayor en lo referido a antocianinas, con máximos en el caso del uso de arándanos. Es importante destacar que las antocianinas son compuestos muy termolábiles y que un gran porcentaje se pierde por el proceso de extrusión. A pesar de esto, no existe una relación directa con la actividad antioxidante, ya que el control presenta mayor porcentaje de inhibición del radical ABTS, aunque esto pueda deberse al desarrollo de productos de Maillard que presentan propiedades antioxidantes, y que la adición de los polvos frutales haya inhibido esta reacción, generándose menor cantidad de compuestos bioactivos. En relación a la oxidación lipídica, luego de 3, 6 y 11 semanas de almacenamiento, las muestras que contienen frambuesa y uva acumulan menor cantidad de compuestos volátiles que el control en los tres períodos de análisis. Algunos compuestos en particular se forman en menor medida en todas las muestras adicionadas con frutas en comparación al control, como es el caso del pentano y el hexanal, en todo el período de estudio (39).

A nivel industrial, uno de los residuos menos aprovechados y mayormente descartado sin considerar sus propiedades es el bagazo de la cerveza, que tiene un elevado contenido de fibra, proteínas y compuestos polifenólicos. Su utilización, además de beneficios nutricionales, supone una ventaja a nivel ecológico y la posibilidad de plantear un nuevo ingrediente en las formulaciones destinadas a alimentación humana. La incorporación del bagazo en reemplazo del maíz incrementa los niveles de proteínas, lípidos, fibras y cenizas y reduce el contenido de almidón. Estos cambios a nivel composicional repercuten directamente en las propiedades físicas. La expansión es menor a medida que se incrementa el contenido de bagazo incorporado, aunque el aumento de la velocidad del tornillo compensa en cierta medida esta diferencia, pero nunca alcanza los valores del control. Lógicamente, los valores de densidad aparente siguen de manera inversa esta tendencia. Al haber una menor cantidad de almidón disponible, el IAA disminuye con el aumento en el porcentaje de sustitución de harina de maíz por bagazo. Por otro lado, su incorporación produce alimentos más oscuros (valores de  $L^*$  más chicos), menores valores de la coordenada  $b^*$  y mayores de  $a^*$ . En relación a las propiedades químicas, la incorporación del mencionado residuo no genera modificaciones en el contenido de polifenoles ni en la actividad antioxidante, independientemente de la velocidad de rotación del tornillo. La digestibilidad de las proteínas no se modifica a pesar de que aumentan los niveles de ácido fítico, considerado un compuesto anti nutricional por su capacidad de ligar minerales y proteínas y, por lo tanto, disminuir su disponibilidad. Sin embargo, se obtienen valores significativamente mayores de almidón resistente, con propiedades funcionales, ya que promueve la formación de ácidos grasos de cadena corta a nivel hepático. Los niveles se favorecen con el uso de bajas velocidades de rotación del tornillo (40).

## 6. Conclusiones

La versatilidad del proceso de extrusión permite desarrollar formulaciones a base de mezclas de harinas o con la incorporación de diferentes ingredientes funcionales vehiculizados como polvos. Además, en este tipo de productos es determinante el efecto conjunto de las condiciones de elaboración y de formulación sobre las propiedades físico-químicas y mecánicas de los alimentos obtenidos. La harina de maíz, si bien requiere suplementación para mejorar su perfil nutricional, es una excelente base para el desarrollo de alimentos listos para consumir debido a que genera productos con excelentes características sensoriales. Esto, impulsa la búsqueda de nuevas fuentes de ingredientes para el desarrollo de alimentos innovadores. El estudio de harinas tradicionales y otras menos convencionales amplía la variedad de ingredientes o materias primas que pueden utilizarse para tal fin. La posibilidad de usar extractos vegetales y subproductos agroindustriales facilita el manejo ecológico de los materiales, al mismo tiempo que se incorporan nutrientes y compuestos bioactivos a las formulaciones, en reemplazo de aditivos sintéticos. Esto supone ventajas a nivel nutricional, económico, industrial y medioambiental. Si bien el agregado de aditivos o ingredientes siempre afecta las características originales de los productos, la posibilidad de modificar las variables de proceso permite su ajuste a las necesidades de la materia prima utilizada. La búsqueda continua de nuevas fuentes, así como la modernización de la tecnología disponible hacen de la extrusión una vía eficaz para el desarrollo de alimentos innovadores que responden a la demanda actual por parte de los consumidores.



## Referencias

1. Boye, J.I. (2015). *Nutraceutical and Functional Food Processing Technology*. Canada. Wiley Blackwell.
2. Bisharat, G.I., Oikonomopoulou, V.P., Panagiotou, N., Krokida, M., & Maroulis, Z. (2013). Effect of extrusion conditions on the structural properties of corn extrudates enriched with dehydrated vegetables. *Food Research International*, *53*, 1-14.
3. Ackar, D., Jozinovic, A., Babic, J., Milicevic, B., Balentic, J.P., & Šubaric, D. (2018). Resolving the problem of poor expansion in corn extrudates enriched with food industry by-products. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *47*, 517-524.
4. Morales, P., Cebadera-Miranda, L., Cámara, R.M., Reis, F., Barros, L., Berrios, J., Ferreira, I., & Cámara, M. (2015). Lentil flour formulations to develop new snack-type products by extrusion processing: Phytochemicals and antioxidant capacity. *Journal of Functional Foods*, *19*, 537-544.
5. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017). *The future of food and agriculture: Trends and challenges*. Rome.
6. Krecisz, M., Wójtowicz, A., & Oniszczuk, A. (2015). Effect of selected parameters on process efficiency and energy consumption during the extrusion-cooking of corn-rice instant grits. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, *7*, 139-145.
7. Beck, S.M., Knoerzer, K., Foerster, M., Mayo, S.C., Philipp, C., & Arcot, J. (2018). Low moisture extrusion of pea protein and pea fibre fortified rice starch blends. *Journal of Food Engineering*, *231*, 61-71.
8. Kristiawan, M., Micard, V., Maladira, P., Alchamieh, C., Maigret, J., Réguerre, A., Emin, M., & Valle, G.D. (2018). Multi-scale structural changes of starch and proteins during pea flour extrusion. *Food research international*, *108*, 203-215
9. Durge, A.V., Sarkar, S., Survase, S., & Singhal, R. (2011). Impact of Extrusion on Red Beetroot Colour Used as Pre-extrusion Colouring of Rice Flour. *Food and Bioprocess Technology*, *6*, 570-575.
10. Masatcioglu, T.M., Ng, P., & Köksel, H. (2014). Effects of extrusion cooking conditions and chemical leavening agents on lysine loss as determined by furosine content in corn based extrudates. *Journal of Cereal Science*, *60*, 276-281.
11. Han, Y., Tran, T.T., & Le, V.V. (2018). Corn snack with high fiber content: Effects of different fiber types on the product quality. *Lwt - Food Science and Technology*, *96*, 1-6.
12. Bisharat, G.I., Oikonomopoulou, V.P., Panagiotou, N., Krokida, M., & Maroulis, Z. (2013). Effect of extrusion conditions on the structural properties of corn extrudates enriched with dehydrated vegetables. *Food Research International*, *53*, 1-14.
13. Alam, M.S., Pathania, S., & Sharma, A. (2016). Optimization of the extrusion process for development of high fibre soybean-rice ready-to-eat snacks using carrot pomace and cauliflower trimmings. *Lwt - Food Science and Technology*, *74*, 135-144.
14. Cueto, M.A. (2016). *Transformaciones físico-químicas de granos de maíz en la elaboración de laminados y extrudados para el desayuno*. Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
15. Robutti, J., Borrás, F., & Eyhéabide, G.H. (1997). Zein Compositions of Mechanically Separated Coarse and Fine Portions of Maize Kernels. *Cereal Chemistry*, *74*, 75-78.
16. Fox, G., & Manley, M. (2009). Hardness methods for testing maize kernels. *Journal of agricultural and food chemistry*, *57* 13, 5647-5657.
17. Farroni, A.E. (2011). *Transformaciones estructurales y físico-químicas de maíces argentinos en la producción de alimentos obtenidos por proceso de gelatinización-laminación*. Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
18. Sompong, R., Siebenhandl-Ehn, S., Berghofer, E., & Schoenlechner, R. (2011). Extrusion cooking properties of white and coloured rice varieties with different amylose content. *Starch-starke*, *63*, 55-63.
19. Tiwari, A., & Jha, S. (2017). Extrusion cooking technology: Principal mechanism and effect on direct expanded snacks – An overview. *International Journal of Food Studies*, *6*, 113-128
20. Ilo, S., & Berghofer, E. (1999). Kinetics of colour changes during extrusion cooking of maize grits. *Journal of Food Engineering*, *39*, 73-80.
21. Caivano, J.L., & Buera, M.P. (2012). *Color in food. Technological and Psychophysical Aspects*. Boca Raton. CRC

22. Agudelo-Laverde, L.M., Schebor, C., & Buera, M. (2013). Water content effect on the chromatic attributes of dehydrated strawberries during storage, as evaluated by image analysis. *Lwt - Food Science and Technology*, *52*, 157-162.
23. Jafari, M., Koocheki, A., & Milani, E. (2017). Effect of extrusion cooking on chemical structure, morphology, crystallinity and thermal properties of sorghum flour extrudates. *Journal of Cereal Science*, *75*, 324-331.
24. Cueto, M., Farroni, A., Rodríguez, S., Schoenlechner, R., Schleining, G., & Buera, M.D. (2018). Assessing Changes in Enriched Maize Flour Formulations After Extrusion by Means of FTIR, XRD, and Chemometric Analysis. *Food and Bioprocess Technology*, *11*, 1586-1595.
25. Paula, A.M., & Conti-Silva, A.C. (2014). Texture profile and correlation between sensory and instrumental analyses on extruded snacks. *Journal of Food Engineering*, *121*, 9-14.
26. Philipp, C., Buckow, R., Silcock, P., & Oey, I. (2017). Instrumental and sensory properties of pea protein-fortified extruded rice snacks. *Food research international*, *102*, 658-665 .
27. Masavang, S., Roudaut, G., & Champion, D. (2019). Identification of complex glass transition phenomena by DSC in expanded cereal-based food extrudates: Impact of plasticization by water and sucrose. *Journal of Food Engineering*, *245*, 43-52.
28. Logié, N., Valle, G.D., Rolland-Sabaté, A., Descamps, N., & Soulestin, J. (2018). How does temperature govern mechanisms of starch changes during extrusion? *Carbohydrate polymers*, *184*, 57-65 .
29. Coulter, L.A., & Lorenz, K. (1991). Extruded corn grits-quinoa blends: I. Proximate composition, nutritional properties and sensory evaluation. *Journal of Food Processing and Preservation*, *15*, 231-242.
30. Coulter, L.A., & Lorenz, K. (1991). Extruded corn grits-quinoa blends: II. Physical characteristics of extruded products. *Journal of Food Processing and Preservation*, *15*, 243-259.
31. Pastor-Cavada, E., Drago, S., González, R., Juan, R., Pastor, J.E., Alaiz, M., & Vioque, J. (2013). Physical and nutritional properties of extruded products based on whole grain with the addition of wild legumes (*Vicia lutea* subsp. *lutea* var. *hirta* and *Vicia sativa* subsp. *sativa*). *International Journal of Food Science and Technology*, *48*, 1-7.
32. Milán-Carrillo, J., Valdéz-Alarcón, C., Gutiérrez-Dorado, R., Cárdenas-Valenzuela, O.G., Mora-Escobedo, R., Garzón-Tiznado, J.A., & Reyes-Moreno, C. (2007). Nutritional Properties of Quality Protein Maize and Chickpea Extruded Based Weaning Food. *Plant Foods for Human Nutrition*, *62*, 31-37.
33. Singh, S., Gamalath, S., & Wakeling, L. (2007). Nutritional aspects of food extrusion: a review. *International Journal of Food Science and Technology*, *42*, 916-929.
34. Cueto, M., Porras-Saavedra, J., Farroni, A., Alamilla-Beltrán, L., Schoenlechner, R., Schleining, G., & Buera, P. (2015). Physical and mechanical properties of maize extrudates as affected by the addition of chia and quinoa seeds and antioxidants. *Journal of Food Engineering*, *167*, 139-146.
35. Li, S., Zhang, H., Jin, Z.T., & Hsieh, F. (2005). Textural modification of soya bean/corn extrudates as affected by moisture content, screw speed and soya bean concentration. *International Journal of Food Science and Technology*, *40*, 731-741.
36. Diaz, J., Suuronen, J., Deegan, K., Serimaa, R., Tuorila, H., & Jouppila, K. (2015). Physical and sensory characteristics of corn-based extruded snacks containing amaranth, quinoa and kañiwa flour. *Lwt - Food Science and Technology*, *64*, 1047-1056.
37. Peksa, A., Kita, A., Carbonell-Barrachina, Á., Miedzianka, J., Kolniak-Ostek, J., Tajner-Czopek, A., Rytel, E., Siwek, A., Miarka, D., & Drożdż, W. (2016). Sensory attributes and physicochemical features of corn snacks as affected by different flour types and extrusion conditions. *Lwt - Food Science and Technology*, *72*, 26-36.
38. Camire, M., Dougherty, M.P., & Briggs, J. (2005). Antioxidant-rich foods retard lipid oxidation in extruded corn. *Cereal Chemistry*, *82*, 666-670.
39. Camire, M., Dougherty, M.P., & Briggs, J. (2007). Functionality of fruit powders in extruded corn breakfast cereals. *Food Chemistry*, *101*, 765-770.
40. Ainsworth, P., Ibanoglu, S., Plunkett, A., Ibanoglu, E., & Stojceska, V. (2007). Effect of brewers spent grain addition and screw speed on the selected physical and nutritional properties of an extruded snack. *Journal of Food Engineering*, *81*, 702-709.